

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610136

研究課題名(和文) 海洋ダイナモ効果を利用した海底下浅部構造の精密探査

研究課題名(英文) Exploration of the shallow electrical conductivity structure below seafloor by using the ocean dynamo effect

研究代表者

浜野 洋三 (HAMANO, Yozo)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・特任上席研究員

研究者番号：90011709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：海洋ダイナモ効果によって発生する電磁場変動モデルの定式化に基づいて、海底観測装置を用いた、海の流れによって誘導される電磁場変動と圧力変化(水位変化)の観測から、海底下の電気伝導度構造を推定する手法を開発した。この手法を実際の海底観測データに適用することによって、津波によって生じる電磁気シグナルに対しては、本手法を用いることで海底下電気伝導度構造の推定が可能であることを示し、さらにその適用限界を見積もることができた。

研究成果の概要(英文)：Based on the theoretical formulation of the ocean dynamo effect, in which ocean currents in the earth's magnetic field generate the variations of electric and magnetic fields due to the motional induction, we developed a new method for probing the electrical conductivity structure under the seafloor from the seafloor observations of the variations of the electromagnetic field and pressure change due to ocean currents. Applying the method to the observed data sets, we demonstrated the possibility of estimating the conductivity structure below seafloor by using the signals generated by tsunamis and estimated the application limit of the present method.

研究分野：地球惑星内部物理学

キーワード：海底電磁気観測 電気伝導度 電磁気構造探査 海洋ダイナモ効果 津波

1. 研究開始当初の背景

海底電磁気観測は地球深部構造の探査には必須項目となっており、世界的に見ても日本が最先端の研究活動を行っている分野の一つである。広域の電磁気構造探査では、大気高層の電離圏、磁気圏を流れる電流を信号源として用いる方法が標準的であるが、深海底で観測する場合には、超高層起源の短周期変動は海水中で減衰するため、通常は周期 10 分以上で変動する信号が使われている。このため一般に海底電磁気探査では地下 10 km 以深の構造が調査対象となる。一方で資源探査やプレート沈み込みに伴う水の分布や移動を調べる等、浅部の電磁気構造探査の必要性が高まってきている。本研究の研究代表者及び研究分担者は深部構造を調べる海底電磁気観測を永年行っており、本研究開始の頃には世界で初めて、海底電磁気観測で海水中で津波によって励起する津波電磁気シグナルの検知に成功した (Toh et al., 2011; Hamano et al., 2011)。

津波電磁気シグナルは地球磁場中を導体である海水が動くことで電流が誘導される、いわゆる海洋ダイナモ効果によって発生する。我々は津波災害軽減の目的で津波電磁気シグナルの発生理論の定式化を行っているが、その過程で海洋ダイナモ効果によって海の流れによって生じる電磁場変動が、海底下の電気伝導度構造に依存することが分かった。また、海底微差圧計 (DPG) による観測から、海の波には 1 秒から 1000 秒、さらにはもっと長周期の変動が常時存在することが分かって来た。以上のことから、海洋ダイナモ効果による電磁場変動シグナルを用いた海底下電磁気構造探査手法の開発を計画するに至った。

2. 研究の目的

深海底での浅部 (深さ 10 km 程度まで) 電磁気構造は、熱水鉱床やメタンハイドレート等の資源探査や、地震・津波の発生源であるプレート沈み込み境界近傍での水の分布・移動の調査等に極めて有効である。しかし、高層大気を流れる電流による外部起源磁場変動を海底で観測する従来の電磁気探査手法では、短周期変動が海水中で減衰するため、深海底下の浅部電磁気構造を探査するのは難しい。本研究では、海洋ダイナモ効果によって海水中に生じる電流を信号源とする短周期 (1 秒 ~ 1000 秒) の電磁場変動を海底で観測することによって、従来困難であった深海底下の浅部電磁気構造を探査する新しい手法を開発し、実用的に使用できるようにすることを目的とする。

このため、海底で磁場 3 成分、電場 2 成分及び圧力変化 1 成分を測定することによって海底下の電気伝導度分布を測定する手法を開発し、実用化することをめざす。圧力変化から

電磁場変動の原因である海の波による水面での波高変化が測定できるので、このソース情報と海洋ダイナモ効果によって結果として生じる電磁場変動との比較から、海底下の電気伝導度分布を探査する。具体的には、従来別々に実施されていた海底電磁場変動観測と海底微差圧計による短周期圧力変化の観測を同時に実施できる装置を開発し、観測記録からそれぞれの変動成分間の相関解析を行うことによって、上記目的を達成することをめざす。

3. 研究の方法

本研究計画では、海洋ダイナモ効果による電磁場変動を用いた海底下の電磁気構造探査方法を確立するために、海洋ダイナモ効果による海底電磁場変動の理論の定式化を行い、海底で観測される磁場 3 成分、電場 2 成分の相互関係、海の流れ (波) との関係の、海底下電気伝導度への依存性を定量的に明らかにする。さらに、これまでに観測された海底電磁場変動記録と近傍で観測された圧力変化の観測結果の解析から、海洋ダイナモ効果による考えられる相関シグナルを、上記で開発された理論に基づいて抽出する。また海底微差圧計による観測結果からは、解析に使える海の波の変動の様子を調べる。次に、海底下の電気伝導度構造を探査のため、同一の装置で電磁場変動と圧力計による水位変化を観測する装置 (ベクトル津波計) を製作し、この装置を用いて、海底観測を実施する。同時観測記録から、電磁場変動と水位変化が相関する記録を抽出して、解析を行うことで、海底下電磁場変動測定の手法を確立し、本探査方法の実用化に向けて、必要な観測期間、測定精度、測定限界等の特性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 海洋ダイナモ効果の理論の定式化

従来の海洋ダイナモ効果の理論は、ゆっくりした波の近似をしたものがほとんどであり、今回目的とする 1 秒から 1000 秒までの短周期変動にはそのままでは適用できないので、海底下の構造を 1 次元層構造として、短周期変動に適用出来る解析解の定式化を行う。

海洋ダイナモ効果の解析的な取り扱いには 1950 年代以降行われてきた。しかし、これらの多くは磁場の自己誘導項を小さいと考える準静的な近似を行っている。このため、主に海流や潮汐による海水の流れ等のゆっくりした流れに伴う磁場変動の解析に用いられており、津波等の短周期の海面変動に伴う電磁場変動の解析には不相当と考えられる。最近、衛星による磁場観測から津波の伝播を調べるために、Tyler (2005) は海水層だけが導体であるという非常に簡単な仮定の下で、海洋ダイナモ効果による衛星高度で観測される磁場の定式化を行った。この定式化では、津波の伝播の位相速度が速いことを考慮して、磁場の自己誘導項を評価しているが、海底下の構造

は絶縁体として近似している。本研究では、磁場の自己誘導項と海底下の地殻・マンツルの電気伝導度構造を考へて、津波の流れ、水位変化と磁場変動との関係を定式化し、観測される水位変化と磁場変化の、海底下の電気伝導度依存性を明らかにするための解析方法を開発した。

本定式化によって、磁場変動と波高変化を同時に観測することによって、その比から、従来の海底電磁気観測に用いられている周期範囲(300秒~8時間)を拡張(100秒~24時間)することが出来、より浅部及び深部の海底下電気伝導度構造に関する情報を得ることができる。さらに従来の海底観測にとってノイズとなる海洋起源の電磁場変動を特定・除去することによって、より高精度の電磁気構造の観測が可能となること分かった。

(2) 海底電磁場変動と圧力変化の従来の観測結果の解析

これまでに磁場変動と圧力変化が同時期に比較的に近傍で観測されている観測記録を解析することで、磁場変動と圧力変化に相関が見られるものを抽出した。これらの結果からは海の波の長波近似が成り立つ津波に伴う変動で、顕著な相関が見られるという結果が得られた。これらは、2006年千島列島沖地震、2009年サモア地震、2010年チリ地震、2011年東北地方太平洋沖地震であった。

これらの観測結果を用いて短周期成分の電場変動、磁場変動の解析を行い、海洋ダイナモ効果による電磁場変動成分を抽出し、外部磁場変動と海洋ダイナモ効果による変動の相互の振幅比が、水深や地域によってどう異なるかを調べた。

また、日本周辺では、広範囲で微差圧計(DPG)の観測がなされている。DPGの記録には短周期の地面の脈動や地震による地動に加えて、海中の波による圧力変動も記録されている。DPGは通常100Hzでサンプリングされており、短周期変動観測を目的とするが、数時間程度の周期の潮汐変動も観測記録から忠実に復元出来ること分かった。さらに、これらのDPGの観測から、地面の脈動等と海中の波によるものを分離し、海水のながれ成分の様子、卓越周期や振幅等を明らかにすることができた。

(3) 海底で電磁場変動と圧力変化を同時観測する装置(ベクトル津波計)の製作

電磁場変動による構造探査のためには、信号源である海の波の変動振幅が大きい程、測定信頼性は増す。この信号源の振幅変動を把握するため、同時観測の際には、観測点近傍の気象、海況を記録し、海底での観測結果との比較を行う必要がある。

このため、(2)で述べた海底電位磁力計及び海底差圧計による津波の観測結果の解析に基づいて、震源域においても、震源から遠く離れた深海底においても、津波のシグナルを

高精度に検知できることをめざした海底津波観測装置(ベクトル津波計)を製作して、この装置による海底観測を開始することができた。

遠地津波を水位変化が小さい深海底でとらえるには、装置の精度が高い必要がある。これまでの海底観測に基づき、津波の最大振幅が1cm程度、対応する磁場変動が0.1nTという小さな津波波形を、圧力変化と磁場変化を同時記録できる装置を製作した。本装置は、それぞれのセンサーの精度を維持すると共に、現在毎分計測である磁力計のサンプリング間隔を、水圧観測と同じ1Hzサンプリングとすることにより、さらに波形間の相関の高い観測をめざした。本装置は浮力材として耐圧ガラス球2個を用いた自己浮上型とし、1年程度の観測期間が可能となっている。

(4) ベクトル津波計による海底観測

ベクトル津波計(VTM)による海底観測は、2012年11月20日から2013年2月9日(四国海盆)及び2014年3月13日から2014年9月11日(仙台沖)で実施した。この観測期間のデータを解析した結果、電磁場変動と水位変化の相関が顕著に見られる変動として、2013年ソロモン諸島地震、2014年チリ地震、及び2014年福島県沖地震による微小津波を記録していることが確かめられた。

VTM1号機は、KR12-18航海によって四国海盆の海底(25°45.94'N, 137°0.48'E, depth=4898m)に設置され、KR13-03航海によって回収され、設置時(2012年11月20日)から回収時(2013年2月9日)までの全期間の観測記録を取得し、解析を行った。回収航海中の2月6日にソロモン諸島でM8の地震が発生し、この地震による津波はVTMに記録された。観測点での津波は初動振幅が0.5cmと小さいが、図1に示す様にDPGに記録された水位変化、磁場変動及び電場変動の間に相関があり、ダイナモ効果に基づく変動であることが確かめられた。

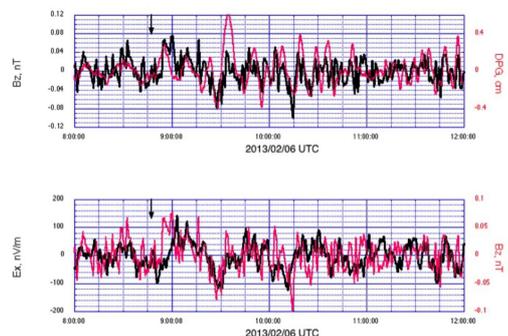


図1 2013年2月6日に発生したM8ソロモン諸島沖地震に伴う電磁場変動と圧力変化の比較。

VTM3号機については、2014年3月13日に

東北海洋生態系調査研究船「新青丸」KS14-02航海によって、仙台東方 300km の海底 (38.23°N143.59°E 3420m) に設置した。この装置の観測中に、遠地地震による津波として 10000km 以上離れた 2014 年 4 月 1 日に発生した M8.2 チリ沖地震、及び近地地震として、170 km の距離で 2014 年 7 月 12 日に発生した福島県沖の地震に伴う津波を検知し、いずれも水位変化と電磁場変動の間に相関が認められた。またこれらの測定記録から、それぞれの観測精度については、それぞれ磁場変動が 0.05nT、電場変動が 30nV/m、DPG による水位変化が 0.2mm と見積もることができた。これらの観測から、ベクトル津波計による海底での津波シグナルの観測によって、海底下電磁気構造の推定が可能であることが確かめられた。その検出限界として、1 cm 以上の水位変化を持つ津波変動が必要であることが分かった。

本研究の成果により、従来困難であった深海底での浅部構造を推定するための新しい方法が、津波シグナルを利用することで有効であることが確かめられた。しかし、津波の発生はコントロールできないことから、今後はより定常的に起こっている海の波を用いた手法の開発をめざす。そのためには、さらに精度を上げた観測装置の開発が必要となる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

Takeo, A., H. Kawakatsu, T. Isse, K. Nishida, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, D. Suetsugu, Seismic azimuthal anisotropy in the oceanic lithosphere and asthenosphere from broadband surface wave analysis of OBS array records at 60 Ma seafloor, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 121, 1927-1947, 2016.
doi:10.1002/2015JB012429

Tatehata H, Ichihara H and Hamano Y., Tsunami-induced magnetic fields detected at Chichijima Island before the arrival of the 2011 Tohoku earthquake tsunami, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 67:185, 2015.
doi:10.1186/s40623-015-0347-3

Barklage, M., D.A. Wiens, J.A. Conder, S. Pozgay, H. Shiobara, H. Sugioka, P and S velocity tomography of the Marlana subduction system from a combined land-sea seismic deployment, *Geochemistry, Geophysics Geosystems*,

査読有, vol. 16, 681-704, 2015.
doi:10.1002 /2014GC005627

Toh, H. and Y. Hamano, The two seafloor geomagnetic observatories operating in the western Pacific, in *Seafloor Observatories - A New Vision of the Earth from the Abyss*, 査読有 Part III, 307-323, Springer, 2015.
doi:10.1007/978-3-642-11374-1_12

To, A., K. Obana, H. Sugioka, E. Araki, N. Takahashi, and Y. Fukao, Small size very low frequency earthquakes in the Nankai accretionary prism, following the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Phys. Earth Planet. Inter.* 査読有, 245, 40-51, 2015.
doi:10.1016/j.pepi.2015.04.007

Tada, N., K. Baba, and H. Utada (2014), Three-dimensional inversion of seafloor magnetotelluric data collected in the Philippine Sea and the western margin of the northwest Pacific Ocean, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 査読有, 15, 2895-2917,
doi:10.1002/2014GC005421

H. Sugioka, Y. Hamano, K. Baba, T. Kasaya, N. Tada, and D. Suetsugu, Tsunami: Ocean dynamo generator, *Scientific Reports*, 査読有, 2014.
doi:10.1038/srep035964//1-7

H. Ichihara, Y. Hamano, K. Baba, and T. Kasaya, Tsunami source of the 2011 Tohoku earthquake detected by an ocean-bottom magnetometer, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 382, 117-124, 2013
doi:10.1016/j.epsl.2013.09.015

[学会発表](計 9 件)

Shiobara, H., M. Shinohara, H. Sugioka, A. Ito, NX-2G: autonomous BBOBS-NX for a highly mobile broadband seismic and tilt observation at the seafloor, *OCEANS2015*, 2015 年 10 月 21 日, Washington DC, USA.

Sugioka, H., Infragravity waves, Tsunami, and Ocean tides observed by a deep sea differential pressure gauge (DPG) - Development, calibrations and performance 2015 OBS Symposium, 2015 年 10 月 4 日, Vancouver, Washington, USA.

H. Shiobara, A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara, Possibility of the observation at the sea floor by using the BBOBST-NX systems, AGU Fall Meeting 2014, 2014年12月5日、San Francisco, USA

浜野洋三、杉岡裕子、多田訓子、藤浩明、南拓人、ベクトル津波計による微小津波の検出、第136回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、2014年11月3日、キッセイ文化ホール、長野県松本市

浜野洋三、杉岡裕子、藤浩明、ベクトル津波計リアルタイム観測に向けたWave Gliderの長期運用、日本地球惑星科学連合2014年大会、2014年5月1日、パシフィコ横浜、神奈川県横浜市

舘畑秀衛、浜野洋三、津波の誘導磁場を利用した高所からの大津波遠隔間奥の可能性、日本地球惑星科学連合2014年大会2014年5月1日、パシフィコ横浜、神奈川県横浜市

浜野洋三、杉岡裕子、多田訓子、藤浩明、南拓人、川嶋一生、ベクトル津波計による海底電磁気シグナルの観測、地球電磁気・地球惑星圏学会第134回総会及び講演会、2013年11月3日、高知大学朝倉キャンパス、高知県高知市

浜野洋三、杉岡裕子、藤浩明、Wave Gliderを用いたリアルタイム海底津波モニタリングシステムの開発、地震学会2013年秋期大会、2013年10月7日、神奈川県民ホール、神奈川県横浜市

浜野洋三、杉岡裕子、多田訓子、伊藤亜妃、藤浩明、南拓人、川嶋一生、塩原肇、馬場聖至、ベクトル津波計による初めての海底観測、日本地球惑星科学連合2013年大会、2013年5月22日、幕張メッセ国際会議場、千葉県千葉市

神戸大学・理学研究科・准教授
研究者番号：00359184

多田 訓子 (TADA, Noriko)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・技術研究員
研究者番号：00509713

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浜野 洋三 (HAMANO, Yozo)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・特任上席研究員
研究者番号：90011709

(2) 研究分担者

杉岡裕子 (SUGIOKA, Hi-roko)